

バラスト軌道の道床安定作業による 道床横抵抗力の回復メカニズム

中村 貴久* 高浦 真行* 景山 隆弘* 早川 容平**

Recovery Mechanism on the Lateral Resistance of Ballasted Track by Stabilization Work

Takahisa NAKAMURA Maiku TAKAURA Takahiro KAGEYAMA Yohei HAYAKAWA

On ballasted tracks, it is known that the lateral resistance of track beds is reduced by performing tamping work and restored by track bed stabilization work using stabilizers. However, the mechanism in which the lateral resistance changes due to these operations has not been sufficiently investigated. In this study, we measured the lateral resistance properties on each side of sleepers by tamping work and stabilization work using a 1/5 scale model test. The results show that the recovery mechanism of the lateral resistance by stabilization work has been clarified.

キーワード：バラスト軌道，道床横抵抗力，バラスト安定作業，つき固め保守作業，画像解析

1. はじめに

レールは温度上昇による伸長を拘束されることで軸力が生じ、軌きょうを横方向に変位させようとする荷重が作用する。バラスト軌道ではこの荷重に対してまくらぎ周辺のバラストが抵抗力（以下、「道床横抵抗力」という）を発揮し、軌きょうの横方向の安定性を確保している。一般に道床横抵抗力は、1本あるいは複数のまくらぎを水平に載荷して載荷荷重とまくらぎ変位を測定する道床横抵抗力試験により評価される。

バラスト軌道においては、タイタンパを用いたつき固め保守作業（以下、「つき固め作業」という）によりバラストが弛緩されて道床横抵抗力が低下するとともに、横方向の安定性が低下する。道床横抵抗力がレールの温度上昇による横方向の荷重を下回ると、軌きょうが横方向に大きく歪む「座屈」現象の発生につながることから、レール温度が上昇する夏期においては、一部の鉄道事業者では道床弛緩作業の制限が設けられている。一方、つき固め作業により低下した道床横抵抗力は、道床安定作業車（以下、「スタビライザ」という）を用いた道床安定作業により、つき固め作業前の状態まで回復することがわかっている¹⁾。そのため、道床安定作業車を用いることで保守作業制限の緩和が期待されている。

つき固め作業および道床安定作業後の道床横抵抗力特性については、基地線における実物大試験によりその検証が行われている²⁾。新品バラストの場合に実施したこの検証では、まくらぎ変位2mm時の道床横抵抗力が、

つき固め作業後に道床安定作業を実施することで3割程度増加し、さらにまくらぎを変位させた後の最終道床横抵抗力では1割程度増加すると示されている。しかし、これらの作業で道床横抵抗力が変化するメカニズムについては十分な検討がされておらず、未解明な点が多い。

そこで本研究では、つき固め作業および道床安定作業を行う保守用重機械として、マルチプルタイタンパ（以下、「MTT」という）およびスタビライザを模擬した1/5縮尺の小型模型を用いて道床横抵抗力が変化するメカニズムを検討した。検討においては、つき固め作業および道床安定作業による道床横抵抗力の変化を評価した。さらに、各作業時においてまくらぎ各面に作用する垂直応力を測定するとともに、まくらぎ周辺のバラストの変形挙動を高速度カメラを用いて撮影し、画像解析を行った。

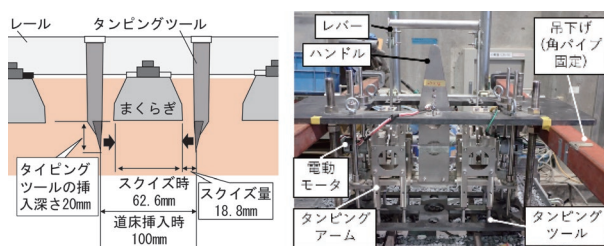
2. 保守用重機械の1/5縮尺模型

2.1 MTTの模型条件

MTTは、ブラッサー&トイラー社製09-16DMTTのタンピングユニットを参考にし、タンピングツールの道床挿入深さおよび変位振幅、タンピングアームの長さ、スクイズ量、タンピングユニットの質量について相似則³⁾を考慮した縮尺1/5の構造とした（図1(a)）。タンピングツールの振動機構は、実機と同様に電動モーターの回転軸に取り付けた偏心シャフトにより、その偏心量相当分の変位振幅をタンピングアームに生じさせ、タンピングツールを振動させる方法とした。また、タンピングユニットの昇降はハンドルの上下動作、スクイズ作業はレバーの前後動作による手動で制御する方法とした。さらに、軌きょうにタンピングユニットの振動が伝達することによ

* 軌道技術研究部 軌道・路盤研究室

** 元 軌道技術研究部 軌道・路盤研究室



(a) タンピングユニットの模型条件 (b) MTT 模型の外観

図1 1/5 縮尺の MTT

る道床の沈下を防止するため、タンピングユニットを固定した角パイプから吊り下げる構造とした (図1 (b))。

2.2 スタビライザの模型条件

スタビライザは、プラッサー&トイラー社製 DTS62N および 09-16DMTT 搭載スタビライザの加振ユニットを参考に、輪軸間距離、起振部の偏心重錘の質量、偏心重錘の偏心量、鉛直荷重 (プレロード) について相似則を考慮した構造とした (図2)。加振機構については、実機と同様に一對の偏心重錘を上下に配置し、電動モーターの回転軸に取り付けたギアを介してそれぞれの偏心重錘を逆方向に同期させて回転させ、まくらぎ長手方向のみの水平振動を生じさせる機構とした (図3)。振動は、車輪フランジ (左右車輪間距離可変式) により軌間内側からと、車輪間中心位置に設けたベアリングローラにより軌間外側からレールを拘束して軌きょうに伝達させた (図2)。また、道床安定作業時に左右の油圧シリンダにより軌道に作用させる鉛直荷重はおもりを積載することで再現した。さらに、道床安定作業時におもりの慣性力が起振力に影響を与えないよう、おもり積載部と起振部の間に振動方向のリニアガイドを設けた。

3. 1/5 縮尺の道床横抵抗力試験

3.1 模型試験の条件

つき固め作業後および道床安定作業後の道床横抵抗力特性を把握するため、1/5 縮尺の軌道模型を用いて、ま

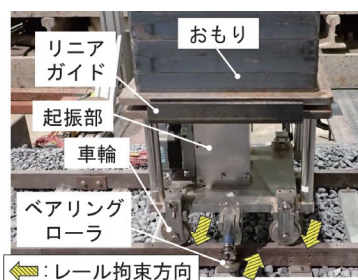


図2 スタビライザ模型の外観

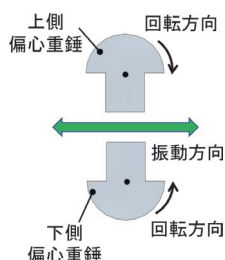


図3 加振機構

くらぎ1本の水平荷重試験 (以下、「1本引き試験」という) を行った。軌道模型は3号PCまくらぎ (以下、「PCまくらぎ」という) の模型9本をまくらぎ間隔114mmで配置した。道床バラストは新品バラストとし、実際の道床バラストの基準粒度⁴⁾ に対して1/5相似粒度の範囲内にある単粒度碎石6号を用いて、密度1.6g/cm³に締め固めて構築した (図4)。

試験ケースは3ケースであり、case1はつき固め作業および道床安定作業のいずれも行わない作業なしの条件、case2はつき固め作業を行う条件、case3はつき固め作業後に道床安定作業を行う条件である。作業なしのcase1では、軌道模型を道床厚40mmで構築し、それ以外のcase2およびcase3では、中央のまくらぎ5本分の道床厚を36mmで構築したのち、模型用ジャッキを用いて4mmこう上させてつき固め作業により道床厚40mmとなるように構築した。

タンピングツールの振動周波数は、実機の標準的な周波数である35Hzに対して相似則を考慮し、 $\sqrt{5}$ 倍した78Hzとした。道床安定作業は、つき固め作業を行ったのち、スタビライザを用いて軌道模型上を走行させながら加振した。加振周波数は、実機の標準的な周波数である35Hzに対して相似則を考慮し、 $\sqrt{5}$ 倍した78Hzとした。道床安定作業時に軌道に作用させる鉛直荷重は実機のシリンダ油圧4MPa (片レールあたりの作用荷重31.4kN) に対して1/125倍に相当する重量490Nのおもりを積載した。また、走行速度は実機の0.4km/hに対して $1/\sqrt{5}$ 倍した50mm/sとし、巻き取り機を用いて一定速度でスタビライザ模型を牽引した。

1本引き試験には、各ケースともに3号PCまくらぎおよび、3号PCまくらぎを模擬した形状で各面にロードセルを内蔵したまくらぎ (以下、「ロードセル付きまくらぎ (横引き用)」) というを用いた。ロードセル付きまくらぎ (横引き用) では、道床横抵抗力 (R) に対して、端面 (R_{end}) に作用する圧縮力、側面 (R_{side}) および底面 (R_{bottom}) に作用するせん断力を測定し、各面の荷重分担を評価した (図5)。道床横抵抗力とまくらぎ各面の負担力の関係を式 (1) に示す。

$$R = R_{\text{bottom}} + R_{\text{side}} + R_{\text{end}} \quad (1)$$

1本引き試験の荷重条件は、荷重速度0.4mm/minとし、水平変位10mmまで荷重した。ここで、鉄道構造物等設計標準・同解説 軌道構造⁵⁾ では、軌きょうの道床横抵抗力試験において、まくらぎ変位の増加に伴い一定となった荷重を最終道床横抵抗力としている。また、実軌道における道床横抵抗力試験では、まくらぎ水平変位2mm時の荷重を軌きょう引きの最終道床横抵抗力として評価している。そこで本試験においては、まくらぎ水平変位

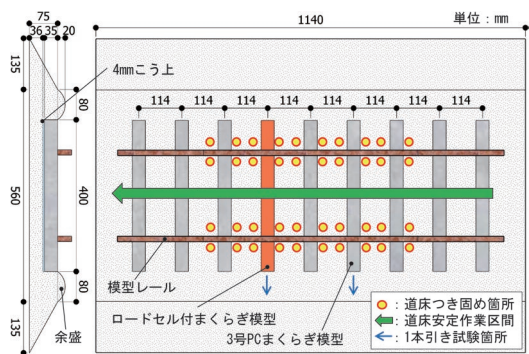


図4 1本引き試験用軌道模型

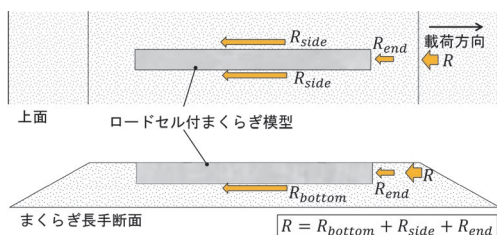


図5 ロードセル付きまくらぎの荷重測定方向

0.4mm (実スケール 2mm) 時の荷重 (以下、「0.4mm 時の道床横抵抗力」という) および水平変位 4~6mm (実スケール 20~30mm) 時の平均荷重 (以下、「最終道床横抵抗力」という) により道床横抵抗力特性を評価した。

3.2 道床横抵抗力特性の評価

図6にPCまくらぎの1本引き試験の荷重-変位関係を示す。0.4mm時の道床横抵抗力は、つき固め作業後 (case2) に対して、道床安定作業 (case3) を行うことで32.4Nから40.3Nに24%増加した。また、最終道床横抵抗力は、つき固め作業後 (case2) に対して、道床安定作業 (case3) を行うことで47.5Nから50.2Nに6%増加した。いずれも実物大試験結果²⁾と概ね同様の傾向となり、つき固め作業後に道床安定作業を行うことで道床横抵抗力が増加し、特に载荷初期時にその効果が発揮されることがわかった。

ロードセル付きまくらぎ (横引き用) の1本引き試験の荷重-変位関係を図7~図9に示す。図7より、作業なし (case1) の0.4mm時の道床横抵抗力は、底面の負担率が端面および側面よりもやや高く43%であったが、最終道床横抵抗力では各面の負担率が概ね1/3ずつとなり、既往の研究⁶⁾と同様の傾向となった。

図7および図8より、つき固め作業後 (case2) の0.4mm時の道床横抵抗力は、作業なし (case1) と比較して、側面が8.7Nから6.6Nに2割程度低下し、端面および底面は概ね同程度であった。最終道床横抵抗力は、作業なし (case1) に比べて、側面が14.6Nから9.7Nまで3割程度低下し、端面および底面は概ね同程度であった。

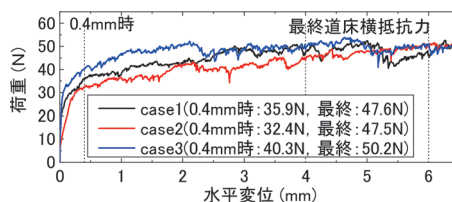


図6 1本引き試験結果 (PCまくらぎ)

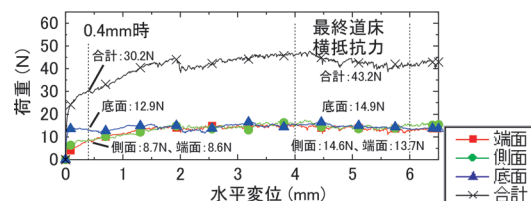


図7 1本引き試験結果 (ロードセル付きまくらぎ (横引き用), 作業なし (case1))

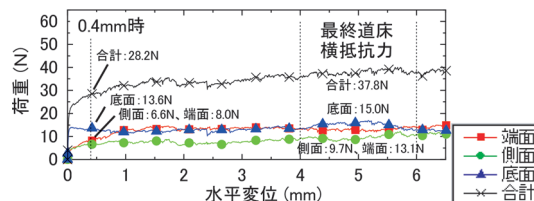


図8 1本引き試験結果 (ロードセル付きまくらぎ (横引き用), つき固め作業後 (case2))

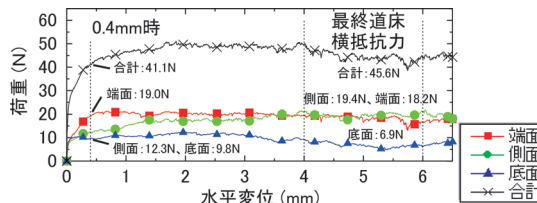


図9 1本引き試験結果 (ロードセル付きまくらぎ (横引き用), 道床安定作業後 (case3))

図8および図9より、つき固め作業後に道床安定作業後 (case3) の0.4mm時の道床横抵抗力は、つき固め作業後 (case2) と比較して、28.2Nから41.1Nに46%増加した。側面は6.6Nから12.3Nに、端面は8.0Nから19.0Nにそれぞれ2倍以上増加したのに対し、底面は13.6Nから9.8Nに低下した。また、最終道床横抵抗力は、つき固め作業後 (case2) に比べて37.8Nから45.6Nに2割程度増加した。ここで、底面の負担力は、4.2節の式(4)⁷⁾からまくらぎの自重およびバラストとまくらぎ底面の摩擦に依存することがわかっている。本試験条件の1本引き試験では、まくらぎの自重が変化しないことから、底面の摩擦に影響を与える底面のバラストの接触状態および締固め状態が変化すると推測される。

4. まくらぎ各面に作用する垂直応力測定試験

4.1 模型試験の条件

ロードセル付きまくらぎを用いてつき固め作業前後および道床安定作業前後のまくらぎ各面に作用する垂直応力を検討した(図10)。小型模型は3.1節と同様の方法で構築した。本ロードセル付きまくらぎは、ロードセル付きまくらぎ(横引き用)の各面を、圧縮力を測定するロードセルに交換したものである(以下、「ロードセル付きまくらぎ(垂直応力用)」という)。軌きょう中央にロードセル付きまくらぎ(垂直応力用)を配置し、まくらぎ各面に作用する各作業後の垂直応力を測定した。つき固め作業および道床安定作業は、3.1節の道床横抵抗力試験と同様の方法で実施した。測定タイミングは、作業前(case1)、つき固め作業の前後(case2)および道床安定作業の前後(case3)とした。測定結果は模型構築前の無負荷の状態を初期値とし、圧縮力をまくらぎの各面の面積で除した垂直応力で整理した。

4.2 まくらぎ各面に作用する垂直応力の評価

既往の研究⁷⁾では、3.1節の式(1)より道床横抵抗力を算出する方法が提案されており、まくらぎの1/5縮尺模型の最終道床横抵抗力を推定できることが示されている。式(1)の計算値と本試験の最終道床横抵抗力を比較すると、PCまくらぎの試験結果47.6Nおよびロードセル付きまくらぎ(垂直応力用)の試験結果43.2Nに対して計算値は44.0Nであり、概ね同程度であった。式(1)では、まくらぎに作用するバラストの土圧に摩擦等を考慮して道床横抵抗力を算出している。以下では、式(2)~式(4)を用いて求めたまくらぎ各面に作用するバラストによる土圧の計算値と、軌きょうの中央に設置した圧縮型ロードセル付きまくらぎで各作業前後に測定した垂直応力を比較した。ここで、各面の垂直応力は、各ロードセルで測定された荷重をそれぞれまくらぎの底面、側面、端面の面積で除して求めた。また、まくらぎ端面に作用するバラストの垂直応力の計算値は、文献7の内部摩擦角($\phi = 55$ 度)を用いてJakyの式から静止土圧係数($K'_0 = 1 - \sin \phi$)を設定して算出した。

$$\sigma_{\text{end}} = (1 - \sin \phi) \times \rho_d \times h \quad (2)$$

$$\sigma_{\text{side}} = \frac{1}{2} K'_0 \times \rho_d \times \ell \times h^2 \times \frac{1}{S_{\text{side}}} \quad (3)$$

$$\sigma_{\text{bottom}} = W_{\text{bottom}} \times \frac{1}{S_{\text{bottom}}} \quad (4)$$

ここで、 σ_{end} :まくらぎ端面の垂直応力、 ϕ :内部摩

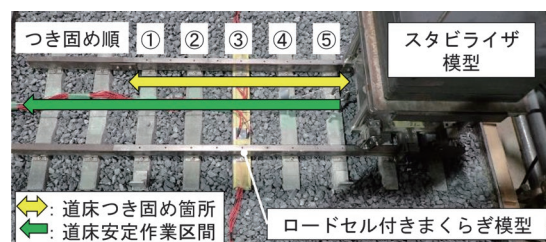


図10 まくらぎ各面の垂直応力測定試験の状況

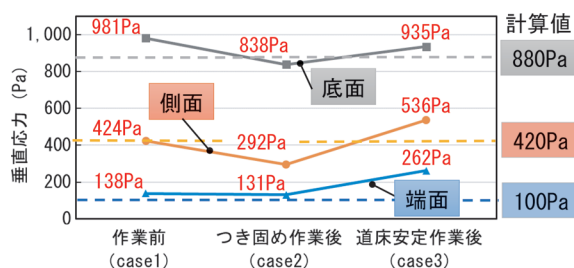


図11 まくらぎ各面の垂直応力測定結果

擦角、 ρ_d :バラストの密度、 h :まくらぎ高さ、 σ_{side} :まくらぎ側面の垂直応力、 K'_0 :静止土圧係数、 ℓ :まくらぎ長さ、 S_{side} :まくらぎ側面積、 σ_{bottom} :まくらぎ側面の垂直応力、 W_{bottom} :まくらぎおよびレール重量、 S_{bottom} :まくらぎ底面積

図11にまくらぎ各面に作用する垂直応力を測定した結果を示す。側面に作用する垂直応力については、作業前(case1)は424Paであり、計算値の420Paと同程度であった。また、つき固め作業後(case2)の垂直応力は292Paとなり、作業前(case1)と比較して0.7倍程度に低下したものの、道床安定作業後(case3)は536Paとなり、作業前(case1)の1.3倍程度に増加した。

まくらぎ端面に作用する垂直応力について、作業前(case1)における端面の垂直応力は138Paであった。一方計算値は100Pa程度であり、測定値の方がやや大きくなった。つき固め作業後(case2)は131Paであり、作業前(case1)と比較してほぼ変化がなかった。それに対し道床安定作業後(case3)は262Paとなり、作業前(case1)と比較して1.9倍に増加した。

まくらぎ底面に作用する垂直応力は、作業前(case1)が981Pa、つき固め作業後(case2)が838Pa、道床安定作業後(case3)が935Paとなり、レールおよびまくらぎの自重から求めた計算値880Paと概ね同程度であった。ここで、軌きょうの状態では、各作業後の隣接まくらぎの支持状態の変化にともない、当該まくらぎの底面に作用する軌きょうの自重が変化し、垂直応力がわずかに変化したと考えられる。

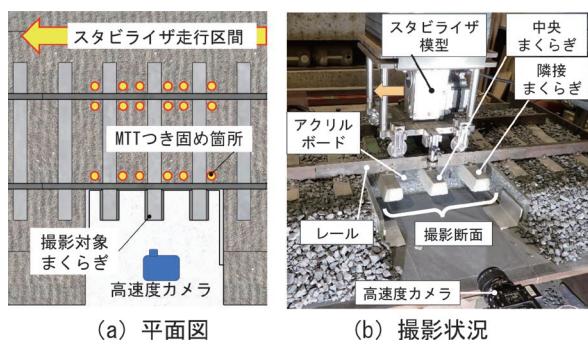


図 12 レール長手方向断面の撮影方法

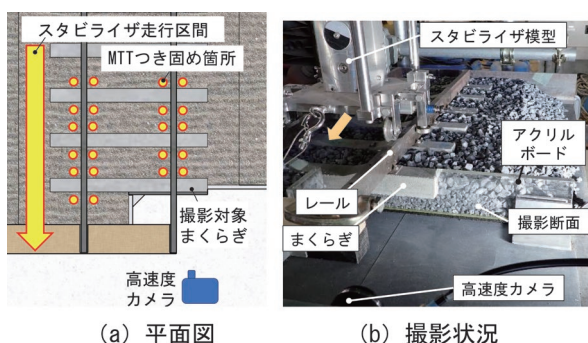


図 13 レール直角方向断面の撮影方法

5. 画像解析によるバラストの変形挙動の評価

5.1 高速度カメラによる撮影試験の方法

つき固め作業時および道床安定作業時におけるバラスト粒子の挙動を PIV (Particle Imaging Velocimetry: 粒子画像流速測定法) による画像解析で可視化することを目的とし、縮尺 1/5 の小型模型による撮影試験を実施した。

試験ケースは case4~case8 の全 5 ケースである。撮影は高速度カメラを用いて、つき固め作業時と道床安定作業時におけるレール長手方向およびレール直角方向の各断面に対して行った (図 12 および図 13)。レール長手方向断面の撮影は、軌道模型のまくらぎ 9 本のうちの中央のまくらぎ 3 本に対して、レール直下の位置に透明の亚克力ボードを設置し、つき固め作業時 (case4) および道床安定作業時 (case6) に行った。レール直角方向断面の撮影は、まくらぎ 6 本の軌道模型の片側端部のまくらぎ直下の位置に亚克力ボードを設置し、つき固め作業時 (case5) および道床安定作業時 (case7) に行った。また、上記に加えて、道床安定作業時の道床上面 (case8) のバラスト変形挙動も撮影した。撮影条件は、撮影速度 100fps、解像度 1920×1080pixel とし、各作業前後の 2 枚の画像を用いて、直接相互相関法による PIV 解析で変位増分ベクトルを求め、せん断ひずみを算出した。

5.2 画像解析結果

図 14 につき固め作業時 (中央まくらぎ) のレール長手方向断面の画像解析結果 (case4) を示す。軌道こう上によりまくらぎ下に生じた 4mm の空隙に対し、つき固め作業によりまくらぎ側面からのバラストが 3mm 以上移動してまくらぎ下に押し込まれ、まくらぎ底面とバラストが接触している状況を確認した。また、隣接まくらぎのつき固め時に、まくらぎ側面のバラストが中央まくらぎ側に移動し、まくらぎ下の隙間にバラストが押し込まれていた。まくらぎ側面では、タンピングツールがまくらぎ下に挿入されてスクイズする際に、バラストが乱されながらまくらぎ下方向に移動することで、まくらぎの方に作用する垂直応力が低下したと考えられる。

図 15 につき固め作業時 (中央まくらぎ) のレール直角方向断面の画像解析結果 (case5) を示す。タンピングツール挿入箇所では、まくらぎ底面のバラストが上方向に 3mm 以上移動した。また、軌道こう上時に生じたまくらぎ下の空隙に、タンピングツール挿入位置以外でもバラストがつき込まれ、まくらぎ底面とバラストが全体的に接触している状況が確認された。まくらぎ端面のバラストは、つき固め作業時にまくらぎ下のバラストとともに軌道外側に移動する挙動が確認されたが、移動量は 1mm 以下であり、まくらぎ端面に作用する垂直応力が変化していないことから、道床横抵抗力に与える影響は小さいと考えられる。

図 16 に道床安定作業時のレール長手方向断面の画像解析結果 (case6) を示す。道床安定作業時にまくらぎ側面および底面の周辺のパラストが沈下し、特にまくらぎ周辺ではバラストが 3mm 以上沈下した。これより、水平加振によってまくらぎ周辺のパラストが締め固められ、まくらぎに作用する垂直応力が増加したと考えられる。

図 17 に道床安定作業時のレール直角方向断面の画像

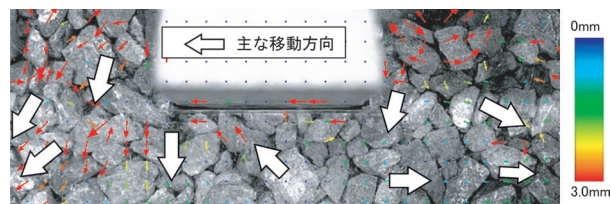


図 14 つき固め作業時の画像解析結果 (case4)

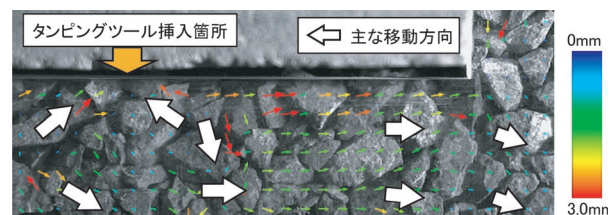


図 15 つき固め作業時の画像解析結果 (case5)

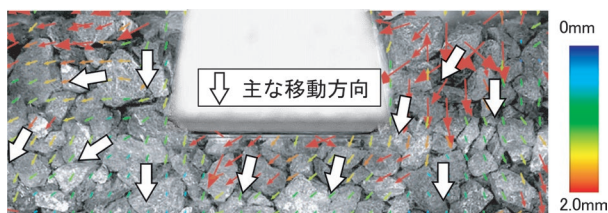


図 16 道床安定作業時の画像解析結果 (case6)

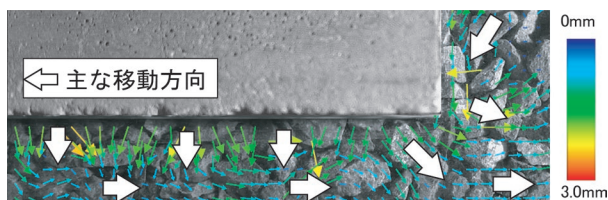


図 17 道床安定作業時の画像解析結果 (case7)

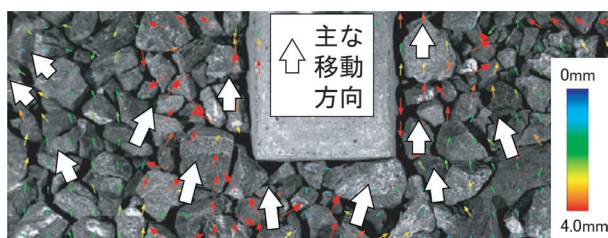


図 18 道床安定作業時の画像解析結果 (case8)

解析結果 (case7) を示す。道床安定作業によりまくらぎ底面のバラストが全体的に 1.5mm 程度沈下するとともに、軌道外側に 1mm 程度移動した。まくらぎ端面においては、道床肩部の表面バラストがまくらぎ側に 1mm 程度移動し、端面に接触する範囲では底面側に向かい沈みこむ挙動が確認された。その結果、まくらぎ端面の垂直応力が増加したと考えられる。

図 18 に道床安定作業時 (case8) の軌道模型上面の画像解析結果を示す。加振点が隣接まくらぎを通過する時点からバラストが徐々に移動し始め、当該まくらぎ直上の通過前～通過中～通過後において道床肩部からまくらぎに向かってバラストが 4mm 以上移動しており、端面に接触する範囲では底面側に沈み込んでいく挙動が確認された。また、まくらぎ側面のバラストはまくらぎに沿って軌間内側へ向かって水平方向に移動しており、これによりまくらぎ間のバラストが水平方向に締め固められ、まくらぎ側面の垂直応力が増加したと考えられる。

以上より、つき固め作業によりまくらぎ側面のバラストが乱されながらまくらぎ下方向に移動する挙動が確認されたことから、まくらぎ側面の垂直応力の低下とともに道床横抵抗力も低下したと考えられる。その後の道床安定作業により、まくらぎ間およびまくらぎ端面のバラストが上面から底面に向かって移動する挙動が確認された。その締め固め効果により垂直応力の増加とともに道

床横抵抗力も増加したと考えられる。

6. まとめ

本研究では、つき固め作業および道床安定作業により道床横抵抗力が変化するメカニズムを検討するため、1/5 縮尺の小型模型試験を行った。以下に本研究で得られた知見を示す。

- (1) 道床横抵抗力試験により、道床安定作業を行うことで、まくらぎ変位 0.4mm (実スケール 2mm) 時の道床横抵抗力はつき固め作業後に対して 24% 増加、最終道床横抵抗力は 6% 増加することを確認した。
- (2) まくらぎの各面に作用する垂直応力の測定試験により、つき固め作業によりまくらぎ側面の垂直応力が低下するのに対し、道床安定作業によりまくらぎ側面および端面の垂直応力が増加することを確認した。
- (3) 画像解析によるつき固め作業時のバラスト変形挙動から、まくらぎ側面は、タンピングツールがまくらぎ下に挿入されてスクイズする際に、バラストが乱されながらもまくらぎ下に移動しており、これにより、まくらぎ側面に作用するバラストの垂直応力が低下し、道床横抵抗力が低下したと考えられる。
- (4) 画像解析より、道床安定作業時の加振点の通過時に、道床肩部上面のバラストがまくらぎに向かって移動し、まくらぎ端面から底面に向かって沈み込んでいた。また、まくらぎ側面のバラストはまくらぎに沿って軌間内側へ向かい水平方向に移動する挙動を確認した。これにより、まくらぎ端面およびまくらぎ側面のバラストが水平方向に締め固められて垂直応力が増加し、道床横抵抗力が増加したと考えられる。

文献

- 1) 高井秀之：ダイナミック・トラック・スタビライザ (DTS) に関する文献調査，日本鉄道施設協会誌，Vol.30, No.11, pp.44-47, 1992
- 2) 吉川秀平，高尾賢一，桃谷尚嗣，中村貴久，伊藤壱記：大型保線機械によるつき固め作業後の道床横抵抗力特性の検証試験，鉄道工学シンポジウム，2021
- 3) 新版軌道材料編集委員会：新版軌道材料，第 7 編道床バラスト，pp.382-383, 2011
- 4) 香川崇章：土構造物の模型振動実験における相似則，土木学会論文集，第 275 号，pp.69-77, 1978
- 5) (公財) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 軌道構造，2012
- 6) 関根悦夫，中村貴久，平尾博樹：バラスト軌道の道床横抵抗力に関する模型試験，土木学会年次学術講演会，IV -237, pp.473-474, 2009

7) 市川拓真, 早野公敏, 中村貴久, 桃谷尚嗣, 小池陽平: 極限釣り合い法を用いた鉄道バラスト軌道の道床横抵抗力の

推定, 土木学会論文集 E1, Vol.70, No.3, I_71-I_77, 2015